

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26610076

研究課題名(和文) Nb超伝導加速空洞と最先端超伝導技術の融合による4K運転の実現

研究課題名(英文) Realization for 4K operation using Nb superconducting cavity and advanced superconducting technology

研究代表者

吉田 光宏 (Yoshida, Mitsuhiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授

研究者番号：60391710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導加速器の空洞材質としては現時点では材料の質から $T_c=9.2\text{K}$ のニオブが唯一の候補材料である。しかし高周波空洞では転移温度以下なら使えるというわけではなく、金属中の電子が高周波に散乱される異常表皮効果によってQ値が制限を受けるため、 $T_c=1.5\text{K}$ まで冷却しないと必要なパフォーマンスが得られない。1.5Kに冷却するには、液体Heをさらに蒸発冷却する必要があり、超伝導空洞の冷却システムを複雑にし、コスト増につながっている。本研究では $T_c$ の高い材料としてNbNの成膜を行い、これを用いてクーパ対を供給する方法等の研究を行った。さらに他の超伝導技術を利用した方法についても検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Superconducting accelerating structure is made of Nb which has  $T_c$  of 9.2 K, and it is currently only candidate. The anomalous skin effect which is caused by the electron scattering by the RF field makes the limitation of the quality factor and the operating temperature of 1.5 K is required. This causes the difficulties of the cooling system. In this research, the NbN thin film is used for the higher temperature material and cooper pair is supplied from this NbN to Nb. Further another advanced superconducting technology is adopted for the better performance.

研究分野：加速器

キーワード：加速器 超伝導

## 1. 研究開始当初の背景

超伝導加速器は近年、高エネルギー加速器としては大強度陽子加速器(例えば ProjectX)、高エネルギー電子リニアック(例えば ILC)、放射光としては XFEL(例えば EuroXFEL、SLAC-Superconducting XFEL)及び ERL 等の既に運転が始まっているものや大型の将来計画で、大電流を効率良く加速できる現時点で最良の方法として様々な先進の加速器に採用されている。

超伝導加速器の空洞材質としては現時点では材料の質から  $T_c=9.2\text{K}$  のニオブ(Nb)が唯一の候補材料である。しかし DC 抵抗と違い、高周波空洞では転移温度以下なら使えるというわけではなく、金属中の電子が高周波に散乱される異常表皮効果(Anomalous Skin Effect)によって  $Q$  値が制限を受けるため、 $T_c=1.5\text{K}$  まで冷却しないと必要なパフォーマンスが得られない。1.5K に冷却するには、液体 He をさらに蒸発冷却する必要があり、これが超伝導空洞の冷却システムを複雑にし、コスト増につながっている。

そこで、これまで超伝導加速器の試験施設の建設や、薄膜高温超伝導空洞の開発、超伝導高周波空洞を利用した超伝導検出器の開発に関わってきたが、これらの開発の中で、超伝導について様々な知見を得て、Nb 超伝導空洞の 1.5K 運転の問題を打破できる、いくつかの方法の着想に基づいて 4K で動作できる超伝導空洞の基礎研究に着手した。

## 2. 研究の目的

本研究では Nb 超伝導加速空洞に最先端の薄膜超伝導技術を融合するという今まで行われていない新しい研究を行う。従来の高電界の Nb 超伝導空洞では異常表皮効果によって 1.5K 運転を必要とし、これが冷凍機を複雑にしていた。本研究の超伝導技術が成功すれば Nb 超伝導空洞が液体 He または 4K の機械式冷凍機での動作が可能となり、Nb 超伝導加速空洞の運用が圧倒的に容易になると共に、小型加速器などへの適用範囲を大幅に広げる事が可能になる。

4K で動作させるためには 1 つの方法として、 $T_c$  の高い化合物超伝導体を使用するという方法があるが、今まで化合物超伝導等の薄膜生成も行ってきた経験では、均質な膜を空洞内に形成するのが非常に難しく、また  $T_c$  が高くても  $B_c$  が低かったりと高電界で使用できた実績は世界的に見ても無い。

そこで本研究では、このような  $T_c$  の高い化合物超伝導体を使用する方法を採用せず、  
・超伝導加速空洞の表面は実績のある Nb に限定

・今までの実績や原理的には成功している最先端の超伝導技術との組み合わせ  
という方法で、全く新しい超伝導加速空洞の創生に結びつける方法を採用する事にした。

## 3. 研究の方法

既に実績のある最先端の超伝導技術としては、

(1) 近接効果を利用したクーパ対の供給する方法

(2) NIS(常伝導-絶縁体-超伝導)冷却を用いて表面のみ 1.5K に冷却する方法

(3) Nb-絶縁体多層構造にする事で、散乱された電子を反射し、異常表皮効果を抑制する方法

等の Nb 空洞表面の  $T_c$  を向上させたり、冷却するなどの方法を適用する。

「斬新な方法論の提案を行うものである点、成功した場合に卓越した成果が期待できる点等」

Nb 超伝導加速空洞はバルク Nb 材から成型・加工されてきた。しかし Nb バルク材では  
(a) 超伝導状態での熱伝導率はほぼ 0 であり、表面からの冷却効率が非常に悪い

(b) Nb は非常に硬く、高融点で、加工・研磨・電子ビーム溶接等、高度な製造工程が必要である。

(c) Nb はほぼ銀と同価格であり、コストが非常に高い

そこで、今まで開発を行ってきた以下のような超伝導検出器での Nb 膜質の向上や、高温超伝導における空洞内部への成膜方法の研究を融合し、Nb 薄膜による超伝導加速空洞の形成を行う。

・超伝導検出器の共振器の研究の中で、高い  $Q$  と高クエンチ限界の Nb 薄膜の条件出し(図 1 左)

・高温超伝導における空洞内壁への成膜方法の確立(図 1 右)

これらの成果を Nb 超伝導加速空洞内に適用する。これにより母材に銅が使用でき、熱伝導率も高く、加工性に優れ、安価になるため、上記の(a)~(c)のバルク材での問題が全て解決される。

さらに上記の(1)~(3)の研究で、Nb 超伝導空洞が液体 He または 4K 機械式冷凍機で動作可能となれば、運用が圧倒的に容易になり、小型加速器等の適用範囲を大幅に広げる事が可能になる。

## 4. 研究成果

まず  $T_c$  の高い材料として、NbN の成膜条件の最適化を行った。

成膜時の Ar ガスに対する窒素ガスの導入量を 4%~16% まで変化させて NbN の成膜を行い、転移温度をそれぞれ測定したのが図 1 である。この際の膜厚は 135nm で同じ膜厚で評価を行った。

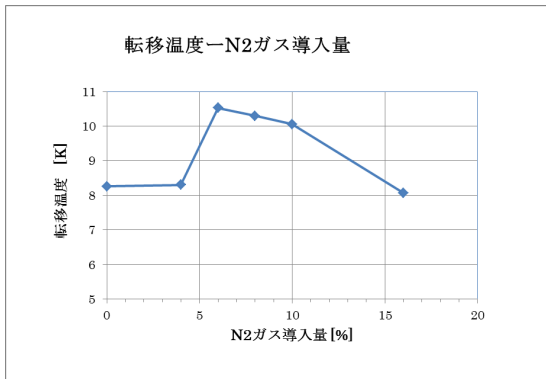


図 1 : NbN の転移温度

最も転移温度の高かった 6% 窒素導入の際の DC 抵抗は図 2 のようになった。

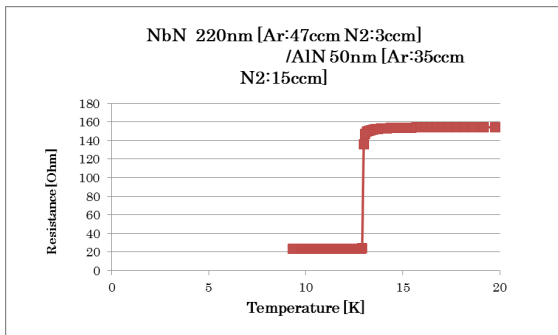


図 2 : NbN の DC 抵抗

この膜を用いて、NbN をベースにして、表面のみ Nb を成膜した CPW 型の共振器を形成し、これの共振を測定した結果が図 3 である

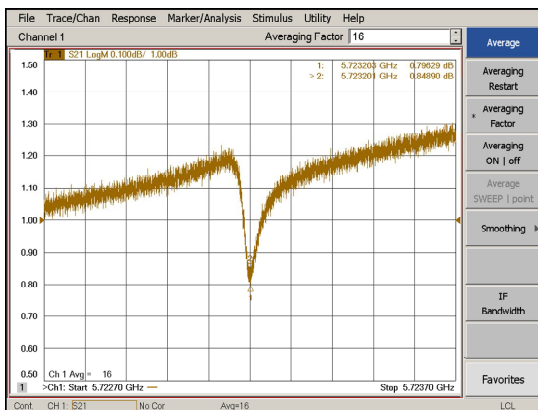


図 3 : CPW 型共振器のマイクロ波共振

これによって、 $Q=15$  万程度のマイクロ波共振は NbN 上の Nb 成膜により得る事ができた。

しかしこの膜質では Nb と比べて十分に転移温度が高いとは言えないため、Nb との優位な差が見られないため、協力機関での NbN 成膜を行い、転移温度の高い成膜を行ったが、膜質が均一ではなく、マイクロ波の共振を観測する事ができなかった。

NIS 冷却については、図 4 のような原理に基づくもので、常伝導のボルツマン分布から超伝導側へトンネル効果でエネルギーの高い物が選択的に抜き取られる事によって冷却が起きるものである。

Normal-Insulator-Superconductor (NIS)

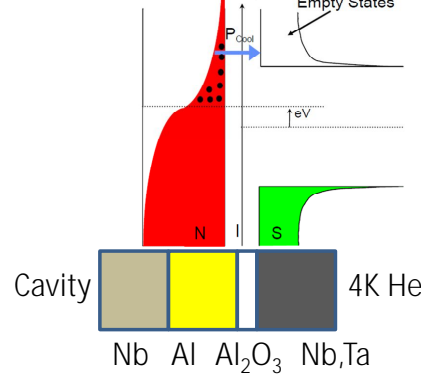


図 4 : NIS 冷却の原理

NIS 冷却について様々な設計を行い、N-I-Nb について計算を行った結果が図 5 である。

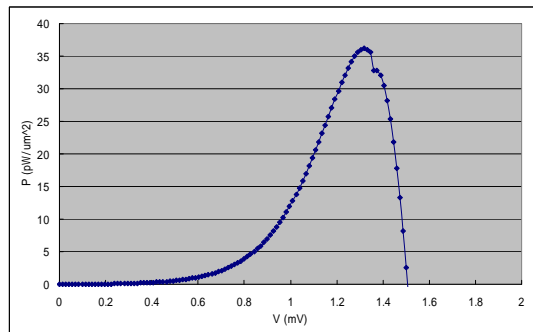


図 5 : NIS の冷却性能

実際にこれを成膜を行い、電圧をかけ NIS 接続については確認できたが、冷却についての詳細な評価をするのは技術的に難しく、評価方法を検討中である。

### 5 . 主な発表論文等

( 研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線 )

[ 雑誌論文 ] ( 計 0 件 )

[ 学会発表 ] ( 計 0 件 )

[ 図書 ] ( 計 0 件 )

[ 産業財産権 ]

出願状況 ( 計 0 件 )

名称 :

発明者 :

権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉田 光宏 (YOSHIDA, Mitsuhiro)  
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究  
施設・准教授  
研究者番号： 60391710

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

( )